# LEVELS AND TRANSITIONS OF ATOMIC NUCLEI

*Experiments and Experimental Methods*

BY

GUNNAR BÄCKSTRÖM

UPPSALA 1960

ALMQVIST & WIKSELLS BOKTRYCKERI AB

# LEVELS AND TRANSITIONS OF ATOMIC NUCLEI

*Experiments and Experimental Methods*

BY

GUNNAR BÄCKSTRÖM
Fil. lic., Norrl.

AKADEMISK AVHANDLING

SOM FÖR VINNANDE AV FILOSOFIE DOKTORSGRAD
MED TILLSTÅND AV MATEMATISK-NATURVETENSKAPLIGA FAKULTETEN
VID UPPSALA UNIVERSITET
FRAMLÄGGES TILL OFFENTLIG GRANSKNING
PÅ FYSISKA INSTITUTIONEN
TORSDAGEN DEN 28 APRIL 1960 KL. 10

UPPSALA 1960
ALMQVIST & WIKSELLS BOKTRYCKERI AB

*Till min familj*

## FÖRORD

Till min lärare och introduktör i kärnspektroskopi, professor Kai Siegbahn, vill jag framföra mitt uppriktiga tack. Hans välvilliga uppmuntran och generösa stöd har varit en ständig sporre i arbetet.

Jag tackar vidare mina medarbetare, särskilt fil. mag. Olov Bergman, vars samarbetsvilja och noggrannhet väsentligt bidragit till slutförandet av detta arbete.

Uppsala i mars 1960

*Gunnar Bäckström*

## Experiments and Experimental Methods

Redan vid tiden för atomkärnans upptäckt 1911–1913 förelåg data om den radioaktiva strålningen som i själva verket avspeglade kärnans förmåga att existera i olika energinivåer. Tolkningen av det då undersökta fenomenet, som kallas inre konversion, försvårades av två faktorer. Dels var den utsända strålningen av samma slag som den som uppstår vid betasönderfallet, dels var konversionsspektra, enligt vad man nu vet, produkten av två olika system av energinivåer, atomens och kärnans. Omkring 1930 rapporterades emellertid två rön, som på ett entydigt sätt visade att kärnan kan anta flera bestämda energiinnehåll. Dessa fenomen var finstrukturen i $\alpha$-strålningens spektrum samt de avgränsade grupperna i protonspektrum från en kärnreaktion. Sammanhanget har senare förtydligats genom att man visat, att kärnor som vid produktionen utsänt en energifattig $\alpha$-partikel eller proton samtidigt utsänder gammastrålning motsvarande det saknade energibeloppet.

För varje atomkärna, d.v.s. ett bundet system av ett bestämt antal protoner och neutroner, finns ett tillstånd av lägsta möjliga energi, och i detta förblir kärnan, om den lämnas utan påverkan utifrån. De enskilda nukleonernas rörelse är inte tillgänglig för fysikaliska mätningar men däremot vissa medelvärden över denna rörelse. Sådana observabla storheter är totala impulsmomentet och de magnetiska momenten, vilka är beroende av partiklarnas hastighet, samt de elektriska momenten, som väsentligen beskriver protonernas genomsnittliga läge under rörelsen. Mätningar av dessa observabler för kärnorna i deras grundtillstånd har utförts i stor utsträckning.

Av största betydelse för förståelsen av kärnans struktur är studier av dess högre, s.k. exciterade energinivåer. Genom undersökning av dessa kärnans tillstånd vinner man givetvis först en mångdubbling av tillgängliga oberoende informationer för varje partikelsystem. Ett väsentligare motiv för denna typ av forskning ligger emellertid i en principiellt ny egenskap hos de exciterade nivåerna i jämförelse med grundtillståndet. Ett exciterat tillstånd har alltid en ändlig livslängd och övergår genom rent elektromagnetisk växelverkan med omgivningen till lägre nivåer genom språngvisa förändringar. Dessa övergångar är fysikaliskt observerbara och sker vanligen under utsändning av gammastrålning. Det finns emellertid alltid en viss sannolikhet för att excitationsenergien skall överföras till atomens elektroner, vilka vid utsändningen får ett diskret energispektrum. Studiet av dessa elektronspektra har fått en oerhörd betydelse, inte bara på grund av att elektronernas energi ger upplysning om energisprångens storlek, utan också därför att elektronernas antal är förknippat med

egenskaperna hos de nivåer mellan vilka övergången sker. Den förändring i kärnans elektriska och magnetiska moment som övergången medför, och som makroskopiskt skulle framkalla en för momenten karakteristisk bromsstrålning, ger i själva verket upphov till ett elektromagnetiskt kvantum, vars uppförande i närheten av kärnan beror av vilka moment som kärnan huvudsakligen förändrat vid övergången. Denna speciella karaktär, multipolordningen, kan bestämmas genom mätning av konversionselektronernas spektrum. Indirekt ger detta dessutom information om nivåernas impulsmoment och paritet.

Ytterligare observabler för exciterade tillstånd är energien över grundtillståndet samt medellivslängden för spontan övergång. Den totala livslängden kan i undantagsfall mätas med nu existerande teknik, vanligen då för lågt liggande energinivåer. Högre belägna nivåer har flera konkurrerande möjligheter till övergång, och här är de relativa sannolikheterna för de tänkbara processerna av stort intresse. Bestämningen av dessa sannolikheter innebär en intensitetsmätning av gammastrålning, vilken kan utföras med välkända metoder. Sannolikhetsfördelningen mellan övergångar är mycket karakteristisk för nivån och är i viss utsträckning oberoende av andra observabler som paritet och impulsmoment.

Teoretiska beräkningar av atomkärnans egenskaper presenterar exceptionella svårigheter. Det faktum att kärnan består av ungefär lika antal av två olika partikelslag, protoner och neutroner, som dessutom har ungefär samma massa, gör att störningsräkning och successiva approximationer principiellt sett bli komplicerade och föga effektiva. Frånsett de välkända krafter av elektromagnetisk natur, som svara för en mindre del av växelverkan mellan nukleonerna, kan kärnkrafterna inte studeras i laboratorieskala och är till sin karaktär mycket mera komplicerade än t.ex. den elektrostatiska attraktionen. De kvantmekaniska rörelseekvationerna förefaller dock vara giltiga i denna nya längdskala.

En betydelsfull ansats som gjorts till en teoretisk behandling av kärnan består i att man beräknar en enskild nukleons rörelse i det kombinerade kraftfältet från de övriga partiklarna. Alternativt har man försökt beräkna nukleonernas genomsnittliga uppförande under rörelsen i kärnan, mot att man avstår från en mera detaljerad beskrivning. Båda behandlingssätten har givit avsevärda resultat för var sin typ av kärnor. Dessa approximationer tillåter en säkrare förutsägelse av paritet och impulsmoment än av övriga data, vilket är att vänta eftersom formalismen automatiskt ger diskreta värden för dessa kvantiter. Nivåers excitationsenergier har inte kunnat beräknas direkt med utgångspunkt från data om kärnkrafterna, men däremot har förhållandet mellan vissa nivåers energier kunnat beräknas ganska noggrant med hjälp av ovannämnda approximationer. Det vackraste exemplet på detta är den kollektiva modellens behandling av kärnors rotation. För samma typ av kärnor har beräkningar av övergångssannolikheter utförts, och kvantitativ överensstämmelse med experiment har erhållits.

Det finns ett stort antal kärnor, för vilka approximativa räkningar ha visat sig

föga framgångsrika, ehuru vissa ansatser gjorts. Denna typ av kärnor, som anses ha en närmast sfärisk partikelfördelning, är den som övervägande studerats i föreliggande arbete. Det är med tanke på den teoretiska situationen naturligt, att arbetet inte inriktats på någon konsekvent vald aspekt av kärnornas excitation, i syfte att testa hållbarheten av publicerade beräkningar. Målet har snarast varit att undersöka kärnorna så fullständigt som möjligt med tillgängliga metoder, i medvetande om att de mest framträdande dragen i ett radioaktivt sönderfall på intet sätt ger den mest värdefulla informationen om kärnstrukturen. Enligt författarens åsikt är alltså ett förutsättningslöst utforskande av kärnornas nivåsystem i nuvarande läge väsentligare än experimentserier avsedda att pröva detaljerna i existerande teorier, som ju enligt vad man redan vet ger en mycket ofullständig beskrivning av kärnan.

För att eventuella sammanhang mellan tillstånd i olika kärnor, eller olika tillstånd i samma kärna, skall kunna framträda fordras framför allt en eliminering av de diskriminerande faktorerna vid det radioaktiva sönderfallet, väsentligen energi, spin och paritet hos moderkärnan. En ofta användbar möjlighet är att studera alternativa sönderfallssätt, som resulterar i samma kärna. Denna metod är fördelaktig även ur den synpunkten att arbetet med nivåschemat förenklas, i det att spektrum sönderlägges i två eller tre partiella spektra. För att få information om exciterade nivåer i MeV-området är det i allmänhet nödvändigt att övergå till att undersöka en kärnreaktion som producerar isotopen ifråga. Avhandlingen behandlar metodiken vid studiet av neutroninfångningsreaktionerna, som nu tilldrar sig allt större intresse. Efter infångningen av en termisk neutron befinner sig kärnan i ett högt exciterat tillstånd, från vilket den övergår genom utsändning av successiva gammakvanta. På grund av att flera kvanta kan förekomma i följd, produceras även nivåer med impulsmoment avsevärt skilt från det ursprungliga värdet för kärnan. I denna metod har alltså energi- och spinselektionen väsentligt upplösts, ehuru andra, nu okända urvalsregler mycket väl kan bli märkbara.

Gradualavhandlingen omfattar följande arbeten.

I. G. Bäckström: A Device for the Precision Measurement of an Inhomogenous Magnetic Field. *Nuclear Instruments*, 1957.

Artikeln beskriver en apparat för mätning av magnetfält, användbar även för inhomogena och svaga fält, och närmast avsedd för de kärnspektroskopiska mätningar, som behandlas i det följande. Konstruktionen baserar sig på en princip först använd av Hedgran, enligt vilken man jämför den inducerade spänningen i två spolar, roterande på samma axel. Metodens begränsningar och möjligheter analyseras ingående. Det visar sig att man genom en lätt modifiering av principen kan utvinna en spänningssignal som blir ett direkt mått på fältavvikelsen. Förutom att man på så sätt vinner en ökad känslighet vid mätning, kan signalen användas för automatisk reglering av magnetfält.

II. G. Bäckström, and O. Bergman: Some Features of the Decay of $Au^{198}$ to $Hg^{198}$. *Arkiv för Fysik*, 1958.

Undersökningen gäller gammastrålningen från sönderfallet av $Au^{198}$ och föranleddes närmast av en rapport från Argonnelaboratoriet om en observerad splittring av andra exciterade tillståndet, vilket var i överensstämmelse med dåtida teori. Resultatet motsäges emellertid av vår undersökning. Dessutom har evidens sökts för ytterligare en nivå, som tidigare observerats från sönderfallet av $Tl^{198}$.

III. G. Bäckström, O. Bergman, and J. Burde: Transitions in $Hg^{199}$ Following the Decay of $Au^{199}$. *Nuclear Physics*, 1958.

Konversionslinjerna från de tre övergångarna har studerats under hög upplösning i en järnfri, dubbelfokuserande spektrometer. Med utgångspunkt från röntgendata har övergångarnas energi bestämts och dessutom har atomiska bindningsenergin kunnat beräknas med hjälp av det samband som måste råda mellan övergångsenergierna. Multipolkaraktären bestämdes ur L-linjernas intensiteter, och i kombination med publicerade livslängder för nivåerna gav detta övergångssannolikheten mellan nivåerna för olika multipolstrålning. Urvalsregeln för banimpuls befanns icke gälla. Intensiteterna för M-linjernas komponenter uppmättes, och resultaten jämfördes med teoretiska beräkningar.

IV. G. Bäckström, J. Lindskog, O. Bergman, E. Bashandy, and A. Bäcklin: Contributions to the Decay of $Tb^{160}$ to $Dy^{160}$. *Arkiv för Fysik*, 1959.

Konversions- och gammaspektrum har undersökts med en dubbelfokuserande spektrometer. Fyra nya övergångar har upptäckts, förutom att data om de övriga kompletterats och skärpts. Sönderfallsschemat har undersökts genom mätning av koincidenser mellan konversionselektroner och betastrålning. En diskussion av den observerade betaförgreningen visar att $Tb^{160}$ bör ha impulsmomentet 3 och udda paritet. Nyligen utförda atomstrålemätningar har besannat denna spinbestämning.

V. G. Bäckström, O. Bergman, J. Burde, and J. Lindskog: The Decay of $Au^{194}$. *Nuclear Physics*, 1960.

Det radioaktiva sönderfall som här undersökts är det mest komplicerade, som hittills är känt. Omfattande mätningar av konversionsspektra resulterade i upptäckten av omkring hundra övergångar. Det presenterade nivåschemat baserades på två väsentligen skilda metoder. Dels undersöktes systematiskt de numeriska sammanhangen i övergångsenergierna, dels undersöktes koincidensförhållandena mellan par av elektronlinjer. Metoderna inte bara kompletterar utan också stöder varandra ömsesidigt. Den höga precision som uppnåtts vid mätningen av övergångarnas energi, är huvudsakligen av värde för att fastställa dessa övergångars relation till kärnans nivåer. Intensitetsdata visar tydligt att tre av nivåerna måste vara av karaktären $0+$.

Dessa slutsatser stöds klart av pågående mätningar av konversionskoefficienterna. En just avslutad undersökning av $Ir^{194}$, som sönderfaller till samma isotop som $Au^{194}$, har på alla punkter bekräftat de reultat som här erhållits rörande nivåerna i $Pt^{194}$.

VI. M. DE CROËS, and G. BÄCKSTRÖM: Transitions Following the Decay of $Se^{75}$. *Arkiv för Fysik*, 1960.

Energi, intensitet och multipolaritet har i största möjliga utsträckning bestämts för de ingående övergångarna. Två icke tidigare rapporterade övergångar har upptäckts. Koincidenser mellan elektroner och gammakvanta har undersökts i syfte att placera dessa övergångar i sönderfallet. Kännedomen om spin och paritet har kompletterats genom detta arbete.

VII. G. BÄCKSTRÖM, and I. MARKLUND: The Decay of $As^{76}$ to $Se^{76}$. *Arkiv för Fysik*, 1960.

På grund av övergångarnas låga konversionskoefficienter i förening med det starka betasönderfallet till grundtillståndet är man i detta fall huvudsakligen hänvisad till att studera den emitterade gammastrålningen. Detta har utförts dels med scintillationsspektrometer, dels med en dubbelfokuserande spektrometer, i vilken fotoelektronerna från uran och bly analyserats. Under arbetets lopp har ett stort antal nya gammalinjer upptäckts. Dessas relation till varandra i sönderfallet har undersökts kvantitativt med koincidenser mellan scintillationsräknare.

VIII. G. BÄCKSTRÖM: Experimental Methods for the Study of Neutron Capture Gamma Rays. *Nuclear Instruments*, 1959.

Denna utredning av metoderna för undersökning av neutroninfångning gjordes i samband med konstruktionen av ett instrument för undersökning av gammastrålning och dess konversion i denna typ av kärnreaktion. En i möjligaste mån komplett översikt har givits över de instrumenttyper som använts för ändamålet, och dessutom har några potentiella men vid den tiden ej tillämpade metoder diskuterats. En viss omsorg har nedlagts på jämförelsen av fördelar och nackdelar hos olika apparattyper.